

Producció d'ordi i relació amb el contingut edàfic en nutrients d'un sòl esmenat amb biomassa pirolitzada sota règim de baixa fertilització

Joaquim Fontseca Falgueras

Projecte de final de carrera de
Ciències Ambientals

Tutor: Dr. Xavier Domene Casadesús

Unitat d'Ecologia, Departament de Biologia Animal, Vegetal i Ecologia,
Universitat Autònoma de Barcelona - Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals
(CREAF)

Setembre de 2012, Bellaterra



INTRODUCCIÓ

ANTECEDENTS

Cap a la dècada de 1870, diferents investigadors com James Orton (1870), Charles Hartt (1874) i Herbert Smith (1879) van topar amb una terra amazònica fosca, molt fèrtil i amb fragments de ceràmica, que la població local anomenava Terra Preta (terra negra) (Woods i Denevan, 2007). Aquestes terres es trobaven sota ús agrícola continuat sense que la seva fertilitat s'esgotés, fet sorprenent per la general poca fertilitat dels sòls tropicals, que obliga a estratègies de crema i cultiu durant uns anys o bé a una aplicació intensiva de fertilitzants, amb totes les conseqüències mediambientals que això suposa.

El seu descobriment no va tenir cap ressò, ja que en aquell moment es considerava que tota la conca de l'Amazones havia de ser fèrtil degut a la gran quantitat de d'espècies vegetals i les seves dimensions. Aquest supòsit fou vigent bona part del segle XX, com ho mostren les campanyes del govern brasiler de colonització agrícola, que van acabar en estrepitosos fracassos econòmics i mediambientals (Winklerprins, 2002).

A finals de segle XX, Nigel J.H. Smith (1980), publicava un article on resumia les troballes realitzades a l'Amazones i conclouia que la Terra Preta era d'origen antropogènic. Tot i les evidències, va ser ignorat un altre cop.

No va ser fins al 1996, quan el pedòleg holandès Wim Sombroek, fascinat per la Terra Preta fins al punt de ser el tema de la seva tesi doctoral, va instal·lar-se a Manaus per realitzar un projecte científic finançat pel Banc Mundial (International Union of Soil Sciences, 2003).

A partir de la seva divulgació i a la d'altres investigadors i revistes científiques, el concepte s'ha anat popularitzant fins el punt de ser un dels temes més importants de recerca actuals.

Els estudis realitzats en la Terra Preta anaven encaminats a caracteritzar i conèixer les raons per les quals aquella terra tenia un color molt més fosc que les terres contigües i sobretot, la significativament més elevada producció agrícola que tenien. El color fosc era degut a una presència de carboni provinent de l'aplicació de biomassa carbonitzada, amb elevadíssima recalcitrància en el sòl.

Tot i que eren terres que havien estat tractades fa molts anys i l'efecte de les pertorbacions podria haver modificat el què realment eren en l'antiguitat (Casselman, 2007), els investigadors es van preguntar si serien capaços de produir sòls similars aportant carboni en forma de carbó vegetal. D'aquesta idea inicial va néixer l'estudi dels potencials beneficis del biochar.

QUÈ ÉS EL BIOCHAR?

El biochar es el resultat de la piròlisi de materials com la fusta, restes de poda, fem, residus alimentaris o altres materials orgànics en presència de poc o gens oxigen i a una temperatura d'uns 700°C (Lehmann i Joseph, 2009). En les plantes de piròlisi actuals, el principal objectiu d'aquest procés és obtenir temperatura, gasos i líquids inflamables, que s'utilitzen com a font

d'energies renovable, però també un material sòlid molt ric en carbó, l'anomenat biochar, que s'ha proposat que podria ser utilitzat com a una esmena pel sòl.

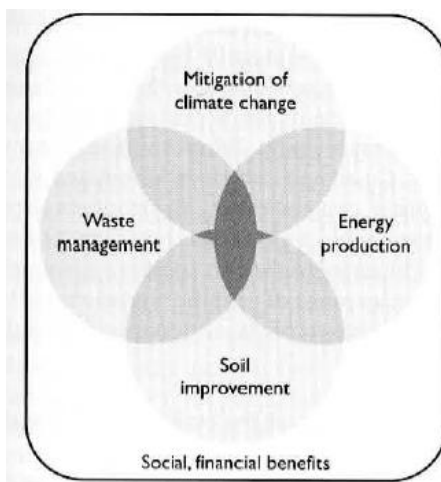


Figura 1. Motivacions per a la producció i ús en el sòl del biochar. Reproduït de Lehmann i Joseph, 2009

BENEFICIS AMBIENTALS DEL BIOCHAR

La piròlisi de biomassa, i per tant també la producció de biochar, podria tenir quatre beneficis ambientals principals: com a esmena del sòl, com a nova via de gestió dels residus, com a estratègia de mitigació del canvi climàtic i com a font d'energia neta i renovable.

Biochar com a esmena de sòl

El rol del biochar com a millora del sòl es especialment important en aquells territoris on l'augment de producció no és un luxe sinó una necessitat, com a l'Àfrica subsahariana i a l'Àsia, on la desnutrició es situa entre el 22 i el 32% del total de la població (FAO, 2006). El 65% de les persones que pateixen fam al món es situen en només 7 països: India, Xina, RDC, Bangladesh, Indonèsia, Pakistan i Etiòpia (Comunicat de premsa de la FAO, 2010, <http://es.wfp.org/>).

Tot i que molts d'aquests països van augmentar la seva producció amb la denominada "Revolució Verda", a aquest augment de producció avui s'hi ha afegit un nou requisit, la conservació del sòl, ja que molts d'aquests sòls han estat explotats d'una manera tant intensiva que la seva fertilitat s'ha vist reduïda en les darreres dècades (Lehmann i Joseph, 2009). L'augment de la fertilitat del sòl per part del biochar es fonamenta en la millora de les:

- a) propietats físiques: augment de la porositat, la retenció d'aigua i de l'airejament; (Downie et al. 2009, DeLuca et al. 2009).
- b) propietats químiques: augment del pH en sòls àcids i per tant de la disponibilitat de nutrients, aport inicial de nutrients i major retenció dels aportats posteriorment per la seva elevada capacitat de retenció de cations (CIC) i en menor mesura anions. Aquesta és la clau de la millora de la fertilitat dels sòls tropicals amb les esmenes amb biochar, donat que són generalment àcids i amb baixa CIC. En sòls ja fèrtils, permetria reduir l'aport de fertilitzants ja que disminuiria les pèrdues per lixiviació (Amonette i Joseph 2009, Major et al. 2009).

- c) propietats biològiques: augment i estimulació de l'activitat dels microorganismes, afectant a la resta de nivells tròfics del sòl, així com al conjunt de funcions ecològiques que realitzen en els agroecosistemes (DeLuca et al. 2009).

El biochar ofereix la possibilitat de fertilitzar els sòls i fer-los més eficients únicament amb materials locals i renovables, reduint la dependència als agroquímics i el seu cost monetari i ambiental (Sánchez, 2002; Lehmann i Joseph, 2009). Per als agricultors és una manera eficient de desprendre's dels residus orgànics i de biomassa i convertir-los en un carbó que es mantindrà al sòl entre 1000 i 10000 anys (Major et al, 2010). Aquesta aplicació de biochar també permetria lluitar contra la degradació del sòl, cada vegada més acusada degut a les tècniques intensives (Foley et al, 2005; Robertson i Swinton, 2005).

Biochar en la gestió de residus

Com ja s'ha comentat anteriorment, es pot utilitzar gairebé qualsevol residu orgànic per a la producció de biochar, reduint-ne per tant el volum de residus i el seu potencial impacte pel medi ambient (Carpenter et al, 1998; Matterson i Jenkins, 2007; Cantrell et al, 2007). Entre els avantatges de la piròlisi en el marc de la gestió de residus, destaquen la disminució de la quantitat d'aquests residus destinats a l'abocador, la valorització energètica d'aquests i la disminució de l'energia consumida en el seu transport (Lehmann i Joseph, 2009). Com a norma general, no s'hauria de permetre utilitzar per a piròlisi biomassa excedent que estigui competint amb altres usos, sobretot en el cas de l'alimentari.

Biochar en la mitigació el canvi climàtic

El biochar és un material enriquit en carboni (al voltant del 90%), majoritàriament en forma d'estructures aromàtiques i per tant difícilment mineralitzable per part dels microorganismes (Lehmann, 2007b). Per aquesta raó, l'aplicació de biochar al sòl aconseguiria retenir una quantitat significativa de carboni que restaria al sòl per un llarg període de temps, en comptes de ser emès a l'atmosfera i contribuir a l'efecte hivernacle (Lehmann et al, 2006; Lehmann, 2007b; Laird, 2008). Observant el procés globalment, la piròlisi de biomassa i la posterior aplicació de biochar al sòl es podria veure com un procés de bombeig de carboni de l'atmosfera a la litosfera.

Biochar i producció d'energia neta

La piròlisi permet produir quatre fonts d'energia neta: la que s'allibera espontàniament del propi procés en forma de temperatura, la de la combustió dels gasos i la de la combustió dels bioolis que també es produeixen, i el biochar com a producte. La temperatura es sol utilitzar com a encebadora del procés de piròlisi, que requereix una pujada inicial de la temperatura, mentre que els gasos i bioolis es poden cremar i ser utilitzats per a la producció elèctrica. El propi biochar es pot valoritzar energèticament si s'utilitza com a combustible, tot i que el seu principal interès és com a esmena al sòl.

En països on l'energia obtinguda a través de la crema de biomassa és més important (Àfrica, Àsia i Amèrica Llatina), l'aprofitament d'aquesta, però en forns domèstics de piròlisi, seria una

opció a tenir en compte per a reduir l'impacte sobre els ecosistemes naturals, sempre que es combini amb l'aprofitament del biochar localment per augmentar la fertilitat del sòl i per tant la producció d'excedents de biomassa (Demirbas, 2004b).

EL BIOCHAR COM A ESMENA DE SÒL

Com s'ha comentat anteriorment, l'aplicació de biochar al sòl pot augmentar la fertilitat del sòl i la producció vegetal, reduint-ne l'aport de fertilitzants, malgrat que no és clar encara quins tipus de biochars són els més adients o fins i tot quin tipus de biochars no són efectius per a aquesta fi. Els factors més importants en determinar les característiques dels biochars són la matèria prima utilitzada i la temperatura a la qual es produeix la piròlisi (Lehmann and Joseph, 2009).

Efectes generals sobre el sòl

L'addició de biochar proporciona pocs nutrients, més o menys depenent de la naturalesa de la matèria prima i de la piròlisi realitzada (Bridle i Pritchard, 2004; Gundale i DeLuca, 2006). Les funcions primordials que realitza el biochar són les d'esmena del sòl i conductor de transformacions de nutrients (Glaser et al, 2002; Lehmann et al, 2003).

L'aplicació de biochar augmenta la retenció d'aigua, capacitat d'intercanvi catiònic (CIC), la superfície d'absorció i la saturació de bases (Glaser et al, 2002; Belanger et al, 2004; Keech et al, 2005; Liang et al, 2006). El biochar augmenta també el pH en sòls àcids (Mbagwu 1989; Matsubara et al, 2002; Lehmann et al, 2003).

En referència als nutrients del sòl, s'ha demostrat que la CIC augmenta juntament amb el pH en biochars vells, mentre que la CIA (Capacitat d'Intercanvi Aniònic) disminueix amb el pH en biochars frescos, i es manté estable però baix en biochar envellit (Cheng et al, 2008). També s'ha suggerit que l'aplicació de biochar juntament amb fertilitzants augmenta l'absorció de fòsfor, metalls alcalins i metalls traça per parts de les plantes (Glaser et al, 2002; Lehmann et al, 2003; Steiner et al, 2007). La influència d'aquest en S, ha rebut poca o cap atenció (Lehmann i Joseph, 2009).

Diversos estudis han demostrat canvis en la activitat microbiana o en la composició de la comunitat degut a l'aport de biochar al sòl (Wardle et al, 1998; Pietikainen et al, 2000; DeLuca et al, 2006). El biochar té la capacitat també d'alterar les poblacions microbianes, ja que augmenta el pH i per tant, afavoreix els bacteris nitrificants autòtrofs i la nitrificació (Stevenson i Cole, 1999; Lehmann and Joseph, 2009). S'ha observat que també pot actuar com a suport físic o hàbitat d'aquests organismes (Pietikainen et al, 2000), afavorint els fongs i bacteris i excluint nematodes i protozous degut a la seva reduïda mida dels porus que conté (Warnock et al, 2007). També s'ha suggerit que el biochar permetria augmentar la micorrizació (Saito, 1990; Ishii i Kadoya, 1994; Ezawa et al, 2002; Matsubara et al, 2002; Yamato et al, 2006).

Efectes sobre la dinàmica de nutrients del sòl

El nitrogen (N) és el nutrient limitant més típic en ambients temperats (Vitousek i Howarth, 1991). El biochar té la capacitat d'augmentar les taxes netes de nitrificació (procés pel qual es forma NO_3^-) en boscos temperats (Berglund et al, 2004; DeLuca et al, 2006), però no està tant clar en el cas de sòls agrícoles (Lehmann et al, 2003; Rondon et al, 2007) i prats (DeLuca et al, 2006). En el cas de sòls forestals, el mecanisme proposat és que el biochar podria absorbir els compostos inhibidors de la nitrificació, ja que mostra una ràpida resposta amb sòls de baixa activitat nitrificant i té un clar efecte estimulants sobre comunitats activament nitrificants (Zackrisson et al, 1996).

En sòls agrícoles tropicals s'ha observat una reducció de la disponibilitat de N amb l'aplicació de biochar (Lehmann et al, 2003). S'ha proposat que aquest fet podria ser degut a:

- a) l'alta relació C/N del biochar, que promouria una retenció de N en forma de biomassa microbiana del N disponible en el sòl (Lehmann and Joseph, 2009).
- b) adsorció en la CIC del biochar de l' NH_4^+ , reduint-se temporalment el N inorgànic del sòl (Lehmann et al, 2006, Le Leuch i Bandosz, 2007).

En el cas de fòsfor (P), l'altre element limitant, s'ha trobat una major absorció per part de les plantes en presència de biochar, però no s'ha investigat en com l'afecta directament (Liang et al, 2006, Lehmann i Joseph, 2009). S'ha pogut demostrar en alguns estudis que l'aplicació de biochar es troba associada per un increment de les micorrizes presents en la rizosfera (Warnock et al, 2007), que podria ser una explicació parcial de la millora de l'absorció de P en les plantes associades a aquestes micorrizes, alhora que ajudaria a reduir la seva lixiviació

Efectes sobre la lixiviació de nutrients

Com ja s'ha esmentat abans, el biochar present al sòl disminueix el grau de lixiviació de nutrients (Downie et al, 2007; Dünisch et al, 2007), retenint-los més temps en el sòl, tot i que les precipitacions són el primer condicionant de la intensitat de lixiviació.

Aquest efecte és major a cultius de blat i horticòles, degut a que aquests tenen les arrels més curtes i més superficials. En els vegetals amb arrels més llargues, com els arbres, l'efecte és menor (Rowe et al, 1998; Allen et al, 2004). Alhora, les característiques del biochar haurien d'augmentar la mida de porus del sòl, i alterar patrons de percolació, temps de residència de la solució al sòl i les trajectòries de flux d'aigua, sobretot en regions amb alta precipitació.

El biochar madur (que porta molt temps en el sòl) té una CIC elevada (Liang et al, 2006), és a dir, presenta major capacitat de retenció i disponibilitat de nutrients per a les plantes i menor lixiviació. Com a les argiles, aquesta CIC elevada pot ajudar en l'agregació del sòl, juntament amb la matèria orgànica i els minerals presents. Malgrat tot, aquest efecte es nota a llarg termini. Tot i que en biochars recentment aplicats al sòl la retenció de nutrients és considerable, la oxidació de la seva superfície genera lentament noves càrregues superficials negativa que fan que els biochars més madurs tinguin major CIC (Cheng et al, 2006, 2008).

OBJECTIU I HIPÒTESIS DE TREBALL

L'objectiu del treball és analitzar de manera experimental si el biochar té un efecte positiu en la producció d'ordi, durant un cicle agrícola complet, en relació amb els canvis que el biochar exerceix en la retenció d'aigua en el sòl, pH, CE (Conductivitat Elèctrica) i el contingut de nutrients del sòl.

Segons la bibliografia consultada i tota la informació recollida i analitzada, vàrem formular unes hipòtesis de partida en termes de canvis en la humitat, pH, CE, contingut de nutrients i producció vegetal final.

Pel cas de la humitat, s'esperava trobar un augment significatiu d'humitat en les mostres amb més quantitat de biochar, ja que aquest té un poder de retenció d'aigua més elevat que el sòl.

També s'esperava observar un augment del pH en sòls amb més biochar per les seves propietats basificants. També s'esperava trobar un augment inicial de la CE per l'aport de certa quantitat de cendres amb el biochar, així com per la mineralització inicial de la fracció més làbil del biochar fresc, seguit d'una disminució per lixiviació i per l'absorció de nutrients per part del cultiu.

Esperàvem també que l'aport de biochar fresc suposés un increment inicial de la disponibilitat de nutrients, tant per mineralització inicial de la fracció làbil del biochar, com per la sabuda gran capacitat del biochar de retenir nutrients (els alliberats pel propi biochar però sobretot pels aportats amb la fertilització practicada en aquest cultiu).

En temes de producció, s'esperava trobar un augment significatiu en la producció del cultiu, resultat de la capacitat del biochar per millorar globalment la fertilitat del sòl.

METODOLOGIA

Sòl experimental

El sòl que utilitzat en l'experiment va ser recol·lectat als camps experimentals de la Universitat Autònoma de Barcelona (latitud: 41.498122, longitud: 2.102210). El sòl era bàsic, calcari i amb un nivell mitjà de matèria orgànica (**Taula 1**). Presentava concentracions baixes de fòsfor i elevades de calci. La seva classe textural era franca, per tant amb percentatges similars d'argila, llim i arena. La capacitat d'intercanvi catiònic (CIC) era entre baixa i mitjana.

Anàlisi	Resultats i unitats	Interpretació
Humitat	1,50%	
pH	> 8,2	Bàsic
CE	0,14 dS/m	No limitant
Matèria orgànica	1,98 % s.m.s.	Mitjà
Carbonats	24 % s.m.s.	Calcari
Nitrogen	0,12 % s.m.s.	Mitjà
Fosfor	9 mg/kg s.m.s.	Baix
Potassi	239 mg/kg s.m.s.	Normal
Calci	7495 mg/kg s.m.s.	Alt
Magnesi	147 mg/kg s.m.s.	Normal
Sodi	< 15 mg/kg s.m.s.	Normal
Argila	25,2%	Franca
Llim gros	20,4%	
Llim fi	16,5%	
Sorra	37,9%	
CIC	13,0 meq/100g S.M.S.	Baixa-mitjana

Taula 1. Característiques principals del sòl de la UAB.

Biochar

El biochar utilitzat en l'experiment for obtingut a Guascor S.A de Miñano, Vitòria. Es tractava d'un biochar produït a partir d'estella de pi i per piròlisi tipus gasificació (600– 900°C durant 75 minuts, amb nivells baixos d'oxigen) (**Taula 2**). El disseny de la planta estava maximitzat per a la producció de gas que s'utilitzava per a producció elèctrica, quedant com a residu final el biochar (5% de la biomassa inicial). El biochar contenia un 71% de carboni, la mida de partícula era majoritàriament d'entre 2 i 0.5 mm i era fortament alcalí (pH=11), degut a la presència significativa de cendres degudes als nivells baixos d'oxigen presents durant el procés de gasificació.

Contingut elemental (%)		Macrogranulometria (%)	
C	71,0 ± 0,2	< 2 mm	~85
H	0,5 ± 0,02	< 5-2 mm	~15
N	0,21 ± 0,02	Microgranulometria (%)	
S	< 0,2	< 0,05 mm	~12
O	27,4 ± 0,2	< 0,1-0,05 mm	~48
		< 0,2-0,1 mm	~4
C:N	6,3:1 ± 0,2	< 0,5-0,2 mm	~7
		< 1-0,5 mm	~5
Densitat aparent (kg/m ³)	161,6 ± 2,0	> 1 mm	~24
Densitat real (kg·m ³)	511,1 ± 8,6	pH	11,7
Porositat total (%)	89,5 ± 0,1	CE (mS/cm)	1,83

Taula 2. Característiques principals del biochar utilitzat. Elaboració pròpia a partir de Sáez Meneses (2010).

Es tractava d'un biochar teòricament força estable en el sòl, tal com es dedueix de les seva ratio H/C i la O/C, tal com es mostren en el diagrama de van Krevelen (**Figura 2**), on es pot observar que aquest biochar (PG) és força estable en comparació a altres biochars obtinguts a partir d'altres processos de piròlisi o els respectius materials de partida.

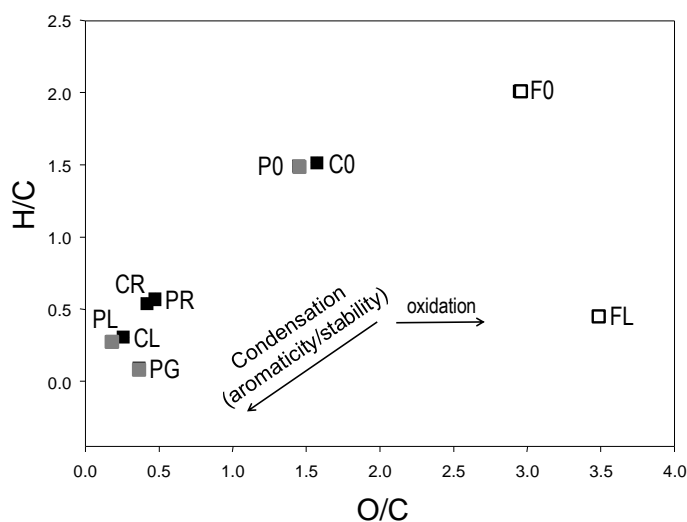


Figura 2. Diagrama de van Krevelen de diversos biochars. Les lletres indiquen diferents processos de piròlisi (L=piròlisi lenta, R=piròlisi ràpida, G=piròlisi per gasificació, 0=material de partida sense pirolitzar) o materials de partida (P=pi, C=pollancre, F=fang de depuradora) (X. Domene, dades no publicades).

Fertilització i cultiu

Com a fertilitzant es va utilitzar un purí obtingut per digestió anaeròbia i assecat tèrmic obtingut de la Planta de Tractament de Purins de Juneda (Lleida). Presentava un 86,5% de matèria seca, en forma granulada, i una elevada conductivitat i labilitat de la matèria orgànica, amb un pH de 6,4 i amb un elevat contingut en N, com indica la C/N de 5,7.

El cultiu d'ordi (*Hordeum vulgare*) utilitzat en l'experiment corresponia a la varietat Graphic (llavor certificada produïda per RAGT, Palencia). Es pretenia simular un cicle agrícola anàleg al de la zona per aquest cultiu, sense aportació d'aigua externa més que la de pluja, i amb un règim de baixa fertilització, per tal d'avaluar la capacitat del biochar de reduir les pèrdues per lixiviació i per tant permetre similars collites amb menor fertilització, com es detalla en el següent paràgraf.

Disseny experimental

El març de 2011 es van muntar 24 mesocosmos de sòl, a l'aire lliure, i adjacents al lloc on es va recol·lectar el sòl, en els camps experimentals de la UAB. Cadascun corresponia a una caixa de polipropilè de 160 litres, amb una àrea superficial de 0.387 m² per caixa (0.73x0.53m) foradada a la part inferior del recinte per permetre el drenatge i on es va col·locar una malla fina per impedir l'entrada de macrofauna. Els mesocosmos foren dividits en 3 tractaments: (C) controls, (B1) aplicació de biochar concentració baixa (5 t/ha) i (B2) aplicació a concentració elevada (30 t/ha), amb 8 mesocosmos per cada tractament. Els mesocosmos es van disposar a l'atzar uns al costat dels altres en dues línies d'est a oest per tal reduir potencials diferències en la insolació (**Figura 3**).

Per tal de simular al màxim un camp de conreu es va aplicar el sòl en dues fases als mesocosmos. Al fons, s'hi va afegir terra directament extreta del sòl, sense cap tractament, simulant un horitzó B, d'uns 0.20 m d'altura. Sobre d'aquest, s'aplicà una nova capa de 0.23 m de cadascun dels tractaments esmentats, simulant un horitzó Ap agrícola típic, resultant del llaurat.

Al març es va sembrar amb ordi a una densitat de 300 llavors/m² (116 llavors o 4.8 g per mesocosmos). Simultàniament, es va fertilitzar el amb purí, aplicant-lo superficialment, a una concentració 50 kg de N per hectàrea, el 50% de la dosi recomanada de nitrogen per al cultiu d'ordi (Johansson et al 1999), calculada en base al contingut en N làbil del purí, equivalent a una aplicació de 37.5 g de purí per mesocosmos.



Figura 3. Muntatge dels mesocosmos.

Mostreig

Per tal d'analitzar i valorar els canvis en les propietats químiques del sòl des de l'inici fins al final de l'any agrícola, es va decidir realitzar 4 mostrejos al llarg del cicle agrícola, per tal de disposar d'un seguiment i poder avaluar canvis significatius (**Figura 4**).

El primer mostreig va ser l'inicial (T1), al març, en el moment de muntatge dels mesocosmos, just abans de la sembra i fertilització, per tal d'analitzar les condicions inicials de l'experiment. L'endemà es va procedir a sembrar i fertilitzar els mesocosmos amb purins. El segon mostreig (T2) es realitzà a principis d'abril, 24 dies després del mostreig. Als 94 dies es va realitzar el tercer mostreig (T3), la segona setmana de juny. El quart mostreig (T4) va ser realitzat a l'octubre, 246 dies després de l'aplicació del biochar i el muntatge dels mesocosmos.

En cadascun dels mostreigs, es va extreure una columna de sòl de 7.2 cm de profunditat i 5.5 cm de diàmetre. En el mateix moment, les mostres es van traslladar al laboratori i s'emmagatzemaren a un congelador a -20°C fins el moment de l'extracció i anàlisi.

Les dades de producció vegetal no van ser obtingudes directament per l'autor del treball però foren proporcionades per X. Domene (dades no publicades) en el marc del projecte de recerca en el que s'emmarca l'experiment. Les dades provenen d'un mostreig de la producció d'ordi realitzat al juliol en el qual es va analitzar, per cada mesocosmos, l'alçada mitjana de les plàntules, el pes total d'espigues, el nombre total d'espigues, nombre de grans per espiga (en base a 25 espigues triades a l'atzar), el pes total de palla i el nombre total de fillols (tiges).

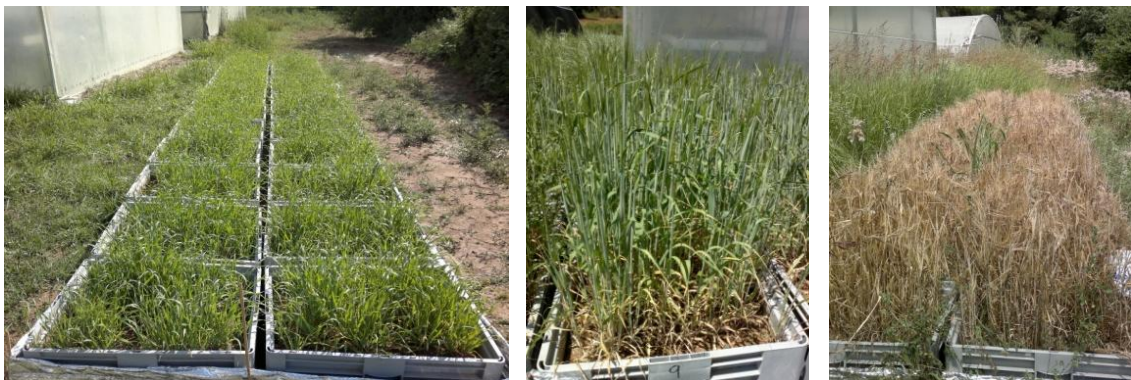


Figura 4. Aspecte dels mesocosmos el mes d'abril de 2011 (esquerra), maig (centre) i juliol (dreta) just abans de la collita.

Preparació dels extractes aquosos

En el mateix dia en què es prepararen els extractes, es van treure els extractes de sòl del congelador a -20°C i es van deixar descongelar durant 1 hora.

Un cop descongelat, es pesaren 10 g de mostra humida per al càlcul d'humitat, tal com es detalla en el següent apartat. A part, i de la mateixa mostra de sòl, es pesaren 40 g de sòl fresc per a la preparació d'un extracte utilitzat tant per la mesura del pH, la conductivitat elèctrica (CE) i el contingut d'anions i cations. L'extracte es va preparar afegint a aquests 40 g de sòl (pes fresc) 200 ml d'aigua destil·lada, per obtenir una relació 1:5. Seguidament, es va agitar durant 60 minuts en agitador horitzontal, a unes 200 rpm.

Un cop agitat, es va centrifugar l'extracte a 8000 rpm i durant 15 minuts, per tal d'obtenir un extracte sense partícules sòlides, per tal de reduir el temps de la filtració, especialment pel cas de les mostres que contenen biochar, per la seva riquesa en partícules molt fines.

Un cop finalitzada la centrifugació, es decantada el sobrenedant i es filtrava per gravetat en embut amb filtres Whatman #42. L'objectiu era obtenir 50 ml per a l'anàlisi de pH i CE, que es realitzà *in situ*, i 50 ml addicionals per a la cromatografia. Com que la cromatografia no es va realitzar en el mateix moment, es guardaren els extractes a -20°C per tal de fer tots els anàlisis alhora, tal com es descriu en el següent apartat.

Anàlisi de les mostres

Humitat

Es va determinar gravimètricament en el moment de preparar els extractes en base a la pèrdua de pes després d'assecar una mostra de sòl fresc a l'estufa a 105°C durant 12 hores. Aquest valor es va utilitzar per corregir els resultats de l'anàlisi d'ions i poder-los expressar sobre pes sec.

pH i CE

El pH i la conductivitat elèctrica es van analitzar per potenciometria mitjançant un pHmetre CRISON GLP 22 (Crison SA, Alella, Barcelona) i un conductímetre CRISON BASIC 30 (Crison SA, Alella, Barcelona), respectivament, en el darrer cas en extracte en agitació continua amb mosca.

Anions i cations

Es determinaren per cromatografia líquida mitjançant un cromatògraf DIONEX DX-100 Ion Chromatograph system (Dionex, Sunnyvale, CA). Abans d'introduir-hi les mostres, aquestes van ser diluïdes 10 vegades per tal d'ajustar les concentracions al rang dels patrons d'anions i cations utilitzats.

Anàlisi estadística

Es va utilitzar anàlisi de la variància (ANOVA), d'una via o de dues segons el cas per avaluar l'efecte de la dosi de biochar o del biochar i en temps, respectivament. També es van utilitzar correlacions de Pearson per demostrar associacions entre variables. En tots dos casos vam utilitzar el programa GraphPad Prism 5 (GraphPad Software, San Diego, CA).

Les variables resposta sotmeses a anàlisi estadístic van ser humitat, pH, CE, anions (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- i SO_4^{2-}), cations (Ca^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} i Na^+) i la producció del cultiu d'ordi (alçada de les plantes, nombre total d'espigues i de fillols, grans per espiga, i el pes d'espigues i de palla).

En l'ANOVA de dos factors, vam avaluar simultàniament les diferències entre tractaments de biochar (0, 5 i 30 tones/ha de biochar) i entre temps de mostreig (0, 24, 86 i 246 dies). L'anàlisi era de mesures repetides, aniuat per mesocosmos, ja que els diferents mostreigs temporals es realitzaven en els mateixos mesocosmos.

Dins de cada temps de mostreig, es va realitzar un ANOVA d'un factor amb la dosi de biochar com a factor per tal de determinar efectes significatius del biochar. Com a test post-hoc, per a determinar diferències entre tractaments dos a dos, es va utilitzar el test de Bonferroni. Els efectes del biochar en la producció també es van avaluar amb aquest test estadístic.

Finalment, vam determinar les associacions entre totes les variables resposta i explicatives mesurades, mitjançant correlació dos a dos de Pearson, per tal de trobar alguna relació significativa entre elles.

RESULTATS

Efecte combinat del tractament de biochar i el temps

Els diferents ANOVA de 2 factors realitzats indiquen efectes significatius tant del biochar com del temps de mostreig en la humitat del sòl, K^+ , Mg^{2+} , NO_3^- i PO_4^{3-} . Per altra banda, altres paràmetres mostren canvis significatius deguts únicament al temps, com és el cas de la CE, Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ , NH_4^+ i SO_4^{2-} . La resta de variables (NO_2^- i el pH) no van diferir significativament en base a aquests factors.

Humitat, pH i CE

Es va observar un augment significatiu de la humitat del sòl en les mostres amb alt contingut de biochar (B2) respecte els controls (C) en tots els temps de mostreig (**Figura 5, Taula 3**), així com diferències entre temps de mostreig, associats a les condicions climàtiques variants al llarg del període estudiat. En les mostres amb baix contingut de biochar (B1) hi vam observar un augment però només era significatiu, en comparació amb els controls, en el primer mostreig (dia 0).

En el cas del pH, no s'observaren canvis significatius globals ni entre tractaments de biochar ni en el temps, on tots els valors estaven propers a 8, tot i que si que es van observar valors lleugerament més elevats en comparació al C en B2, en el segon i tercer mostrejos.

Finalment, es van observar diferències significatives en el temps en la CE, però marginals (no significatives però prop de ser-ho) segons dosi de biochar. Al segon mostreig (24 dies) es va observar un pic en la CE, amb valors que gairebé duplicaven els inicials, associat a la fertilització amb purí uns dies abans. Fora d'aquest mostreig, però, també apareixien diferències significatives entre C i el B2 en el primer, tercer i darrer mostreig.

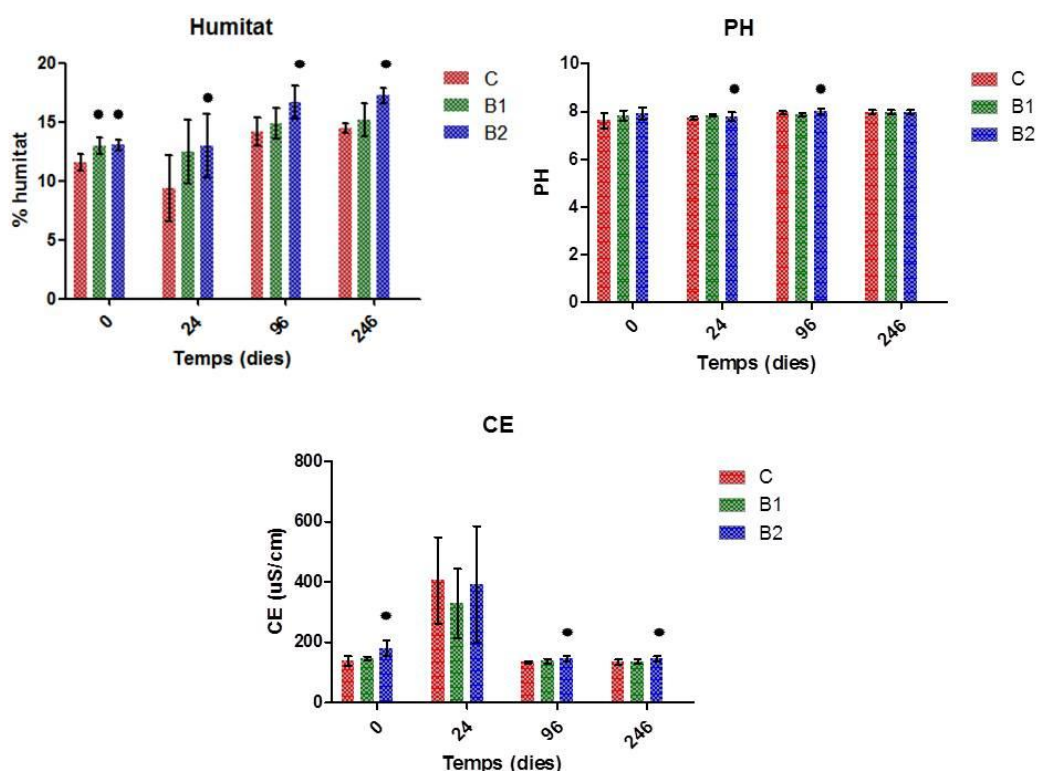


Figura 5. Efectes de l'aplicació de biochar, al llarg del temps, en el contingut d'humitat, pH i conductivitat elèctrica. L'asterisc indica diferències significatives amb el control dins de cada temps de mostreig.

	Temps	Biochar	Interacció
Humitat	< 0,0001	< 0,0001	0,1482
CE	< 0,0001	0,3367	0,721
PH	0,0003	0,0519	0,1281

Taula 3. ANOVA 2-factors de les diferents variables resposta i la seva relació amb la dosi de biochar i el temps. El valor obtingut (p) indica la significació de les diferències, sent $p \leq 0,05$ el valor límit. Marcat en verd apareixen els valors inferiors a 0,05, i per tant, significatius de cara a l'anàlisi.

Cations

Els cations que més van augmentar amb l'addició de biochar van ser el K^+ i el Mg^{2+} , sobretot en el primer cas, però també n'hi hagueren significatius al llarg del temps (**Figura 6, Taula 4**). El K^+ era el cas més clar, juntament amb la humitat, d'una relació directa amb l'aplicació de biochar (**Taula 8a**). Com es pot observar en la **Figura 6**, la concentració de K^+ en B2 fou sempre molt superior a la del control i de B1, descartant-se per aquest motiu que l'efecte fos produït per la fertilització.

El gràfic també ens mostra que en la majoria de cations, l'aport de biochar no va servir per augmentar les concentracions d'aquests ions al sòl ja que el valor en els controls no era significativament diferent al dels tractaments amb biochar. Malgrat tot si que hi havia variacions

estacionals significatives associades exclusivament amb la fertilització i amb la posterior pèrdua per absorció en les plantes/microorganismes o per lixiviació.

Dins els cations, el cas de l' NH_4^+ és el més difícil d'explicar de tots, ja que les desviacions típiques observades eren molt elevades. Això era degut a que els alguns valors triplicaven o quintuplicaven altres valors dins del mateix tractament, fet probablement relacionat amb la distribució irregular del purí, que es va aplicar superficialment.

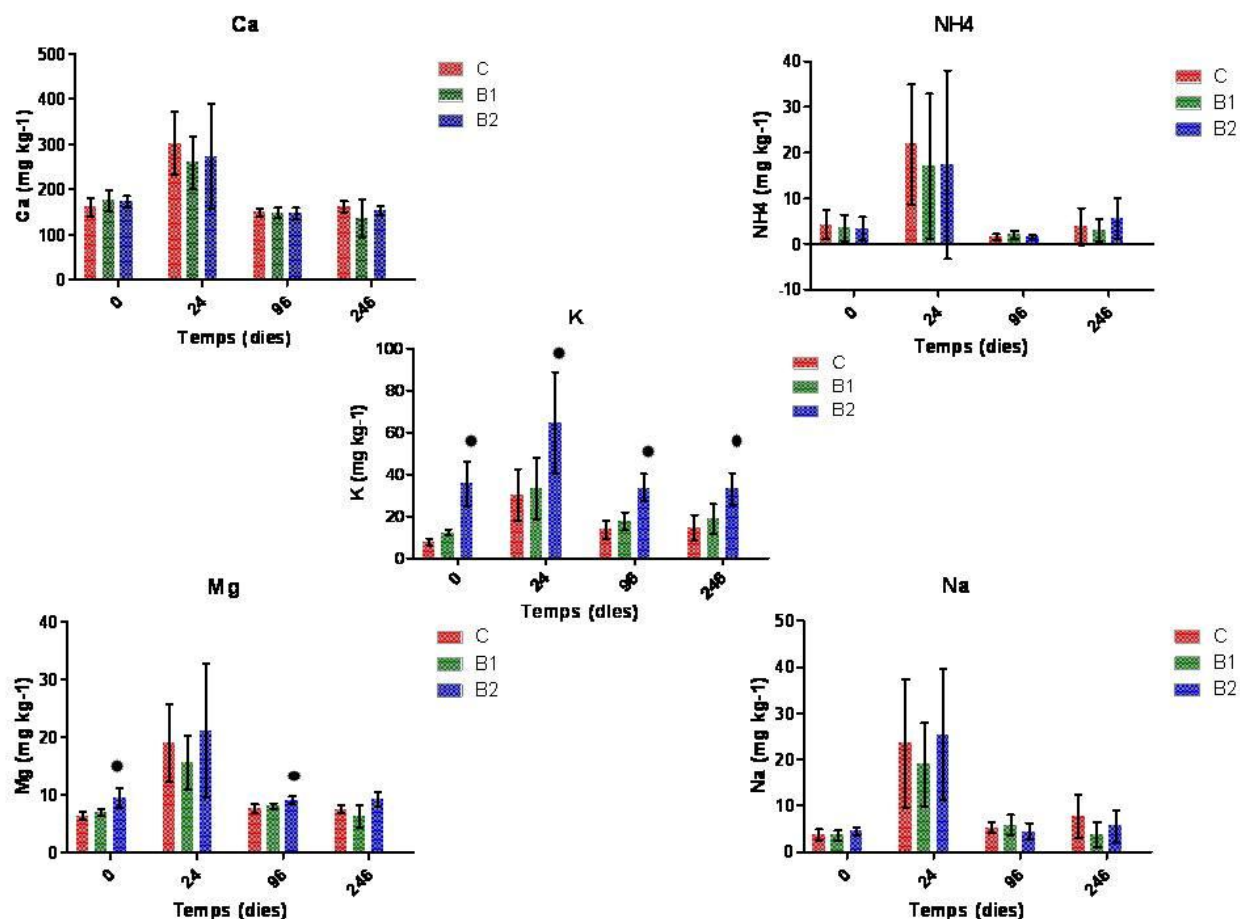


Figura 6. Efectes de l'aplicació de biochar, al llarg del temps, en el contingut catiónic. L'asterisc indica diferències significatives amb el control dins de cada temps de mostreig.

	Temps	Biochar	Interacció
Ca^{2+}	< 0,0001	0,5046	0,6629
K^+	< 0,0001	< 0,0001	0,1285
Mg^{2+}	< 0,0001	0,0432	0,6943
Na^+	< 0,0001	0,4433	0,6661
NH_4^+	< 0,0001	0,8105	0,9568

Taula 4. ANOVA 2-factors de les diferents variables resposta i la seva relació amb la dosi de biochar i el temps. El valor obtingut (p) indica la significació de les diferències, sent $p \leq 0,05$ el valor límit. Marcat en verd apareixen els valors inferiors a 0,05, i per tant, significatius de cara a l'anàlisi.

Anions

Els anions van mostrar pautes comunes amb els cations: tots els anions analitzats augmentaren significativament al segon mostreig, amb valors que s'arribaven a triplicar en relació als altres mostresos (**Figura 7, Taula 5**).

També es va observar que en la majoria de casos la presència de biochar no va canviar significativament les concentracions d'anions amb l'excepció del NO_3^- i el PO_4^{3-} amb concentracions inferiors en el tractament B2 en gairebé tots els temps de mostreig. En el cas del SO_4^{2-} només s'observaren diferències al primer mostreig, amb concentracions significativament superiors en B2, tot i que desapareixien en la resta de tractaments.

Un cas a part fou el NO_2^- , sense efecte de la dosi de biochar ni del temps i amb elevada variabilitat dins de tractament.

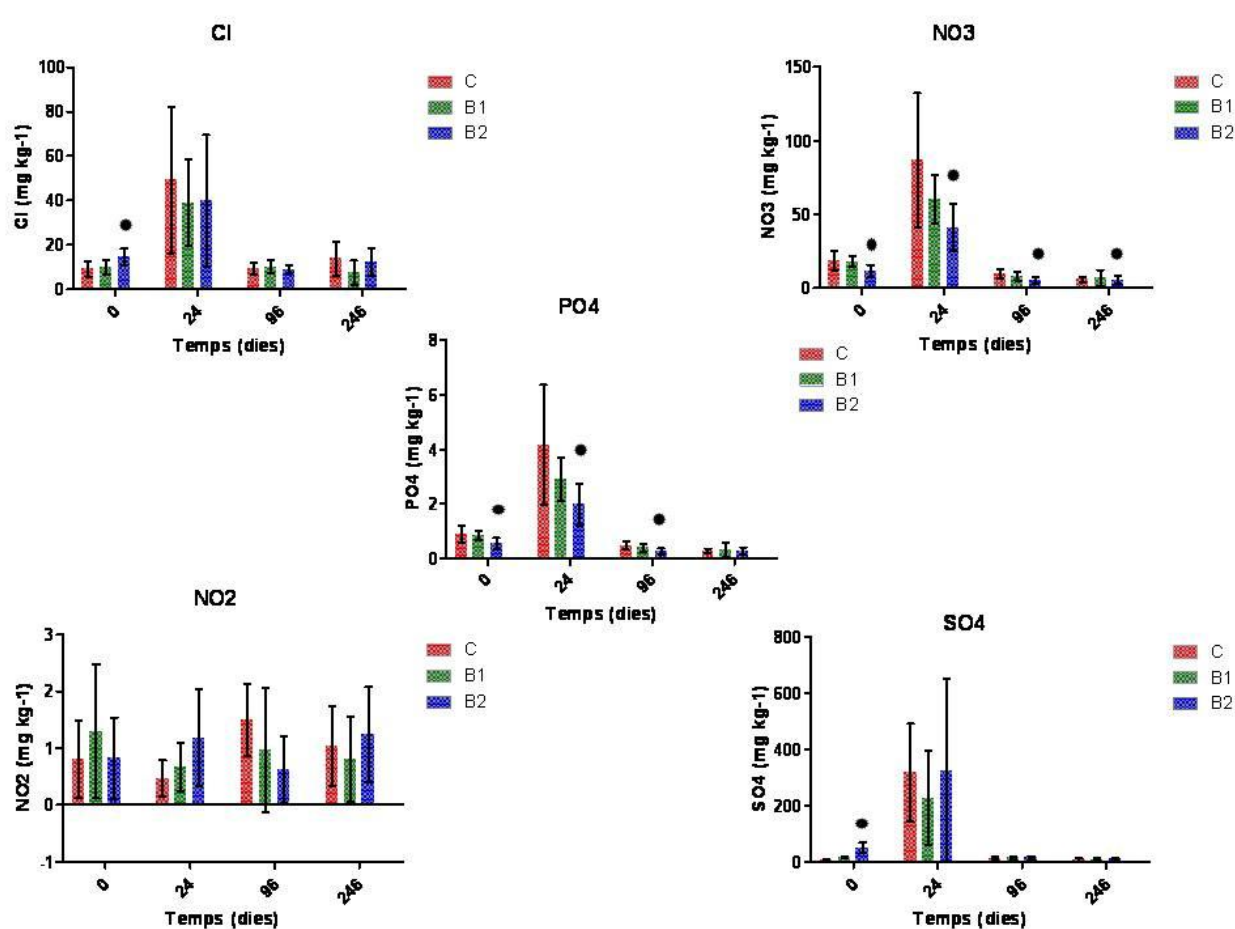


Figura 7. Efectes de l'aplicació de biochar, al llarg del temps, en el contingut aniònic. L'asterisc indica diferències significatives amb el control dins de cada temps de mostreig.

	Temps	Biochar	Interacció
Cl⁻	< 0,0001	0,5801	0,8102
NO₂⁻	0,6747	0,981	0,1123
NO₃⁻	< 0,0001	0,0037	0,0021
PO₄³⁻	< 0,0001	0,0037	0,0021
SO₄²⁻	< 0,0001	0,5349	0,8229

Taula 5. ANOVA 2-factors de les diferents variables resposta i la seva relació amb la dosi de biochar i el temps. El valor obtingut (p) indica la significació de les diferències, sent $p \leq 0,05$ el valor límit. Marcat en verd apareixen els valors inferiors a 0,05, i per tant, significatius de cara a l'anàlisi.

Efecte del tractament amb biochar dins de cada mostreig

En l'ANOVA d'un factor, realitzats per cada variable estudiada entre tractaments de biochar i dins de cada mostreig, van aparèixer efectes significatius en la majoria de variables resposta analitzades, excepte en el cas del Ca^{2+} , Na^{+} i NH_4^{+} on no hi havia efectes significatius del biochar. El valor en taronja per l' NO_2^{-} ens indicava que podria haver-hi un efecte marginal, tot i que no és significatiu.

El test post-hoc de Bonferroni, representat entre parèntesis, ens donava una informació addicional, ja que ens indicava si existien o no diferències significatives entre parelles de tractaments de biochar dins de cada mostreig. A més d'aquesta informació, en la **Taula 6** també s'hi mostra el sentit de les diferències amb els símbols de “més gran” o “més petit”.

	0d	24d	96d	246d
Humitat	0,0002 (C < B1 < B2)	0,0314 (C < B2)	0,0031 (C < B1 i B1 < B2)	< 0,0001 (C < B2)
PH	0,0866	0,007 (C < B2)	0,007 (C < B2)	0,9764
CE	0,0003 (C < B2 i B1 < B2)	0,6286	0,007 (C < B2)	0,0121 (C < B2 i B1 < B2)
Cl⁻	0,0081 (C < B2 i B1 < B2)	0,7158	0,6272	0,142
Ca²⁺	0,2825	0,5901	0,8329	0,147
K⁺	< 0,0001 (C < B2 i B1 < B2)	0,0013 (C < B2 i B1 < B2)	< 0,0001 (C < B2 i B1 < B2)	< 0,0001 (C < B2 i B1 < B2)
Mg²⁺	< 0,0001 (C < B2 i B1 < B2)	0,3928	0,0008 (C < B2 i B1 < B2)	0,0013 (B1 < B2)
Na⁺	0,2655	0,5772	0,2827	0,1108
NH₄⁺	0,7967	0,8183	0,2535	0,3934
NO₂⁻	0,465	0,0577	0,1174	0,5429
NO₃⁻	0,0131 (C > B2 i B1 > B2)	0,0186 (C > B2)	0,0186 (C > B2)	0,0001 (C > B2 i B1 > B2)
PO₄³⁻	0,0131 (C > B2 i B1 > B2)	0,0186 (C > B2)	0,0186 (C > B2)	0,7872
SO₄²⁻	0,0001 (C < B2 i B1 < B2)	0,6491	0,6832	0,5903

Taula 6. Resultat del valor “p” per a una ANOVA 1-factor de les diferents variables resposta entre tractaments de biochar dins de cada mostreig. El valor “p”, de la taula indica si hi ha diferències significatives globals entre les diferents dosis de biochar. Entre parèntesi, s’indiquen els resultats del test post-hoc de Bonferroni de diferències significatives entre dosis de biochar per parelles i el sentit de la magnitud de les diferències.

Efecte del tractament amb biochar en la producció vegetal

En la **Taula 7** s’hi representa la relació entre la dosi biochar i la producció vegetal en el moment de la collita. El valor que apareix correspon al valor “p” de l’ANOVA 1-via, que ens indica que no hi havia relació entre la dosi de biochar i la producció final d’ordi.

Alçada	Espigues	Fillols	Grans/espiga	Pes espiga	Pes tija+fulla
0,5305	0,7809	0,8256	0,9421	0,4911	0,9427

Taula 7. Resultat del valor “p” per a una ANOVA 1-via de les variables de producció vegetal en el moment de la collita.

Correlació entre variables

En les **Taules 8a i 8b** s'hi indica el coeficient de correlació de les correlacions múltiples dos a dos de Pearson calculades. En el cas de les mesures de sòl, es va utilitzar la mitjana dels dos mostreigs centrals (24 i 96 dies), que corresponien al mostreigs en els quals el cultiu estava present, per tal de relacionar-ho amb efectes en la producció d'aquest.

En el cas del biochar s'observà una correlació positiva amb la humitat i el K^+ i una correlació negativa amb el NO_3^- i el PO_4^{2-} . La resta de variables no mostraren correlació amb la dosi de biochar.

En quan a l'efecte dels nutrients i altres mesures de sòl sobre la producció del cultiu, no s'observen associacions destacables, sent el NH_4^+ i Ca^{2+} els únics que mostraren una lleugera correlació positiva amb el pes de palla. També apareixen relacions entre les variables de producció del cultiu, degut a les relacions al·lomètriques, així com també passava amb algunes mesures del sòl.

	Biochar	Humitat	Na	NH ₄	K	Mg	Ca	Cl	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SO ₄	CE
Biochar	1												
Humitat	0,671	1											
Na ⁺	0	-0,090	1										
NH ₄ ⁺	-0,317	-0,170	0,798	1									
K ⁺	0,752	0,481	0,551	0,277	1								
Mg ²⁺	0,081	0,000	0,934	0,798	0,654	1							
Ca ²⁺	-0,376	-0,310	0,777	0,899	0,195	0,792	1						
Cl ⁻	-0,111	0,002	0,774	0,643	0,334	0,705	0,542	1					
NO ₂ ⁻	-0,166	0	0,019	0,158	-0,077	-0,001	0,094	0,144	1				
NO ₃ ⁻	-0,641	-0,542	0,595	0,611	-0,170	0,474	0,713	0,569	0,010	1			
PO ₄ ³⁻	-0,645	-0,538	0,587	0,607	-0,177	0,466	0,707	0,571	0,018	1,000	1		
SO ₄ ²⁻	-0,147	-0,104	0,908	0,911	0,483	0,914	0,873	0,713	0,130	0,572	0,565	1	
CE	-0,074	-0,154	0,944	0,872	0,535	0,942	0,858	0,712	-0,018	0,601	0,593	0,942	1
pH	0,286	0,356	-0,636	-0,584	-0,071	-0,568	-0,711	-0,388	-0,227	-0,529	-0,521	-0,660	-0,579
Alçada	0,096	0,064	0,239	0,274	0,095	0,120	0,303	0,209	-0,044	0,149	0,147	0,214	0,244
Fil·lols	0,041	-0,142	-0,089	-0,068	0,003	-0,134	0,047	-0,189	-0,293	0,071	0,066	-0,134	-0,026
Espigues	0,055	-0,180	-0,131	-0,060	-0,026	-0,126	0,144	-0,206	-0,306	0,045	0,038	-0,124	-0,026
Pes palla	-0,229	-0,368	0,398	0,507	0,034	0,301	0,532	0,214	0,113	0,429	0,426	0,458	0,402
Pes espigues	0,103	0,038	-0,061	-0,188	-0,024	-0,130	-0,028	-0,044	-0,480	0,083	0,078	-0,199	-0,070
Biomassa total	-0,052	-0,210	0,147	0,144	-0,024	0,053	0,292	0,013	-0,444	0,254	0,247	0,088	0,178
Espigues/fil·lol	0,273	0,059	-0,08	-0,050	0,129	-0,019	0,097	-0,077	-0,173	-0,187	-0,191	-0,030	-0,012
Pes espigues/ Pes palla	0,243	0,428	-0,192	-0,392	0,037	-0,210	-0,316	0,038	-0,370	-0,145	-0,144	-0,331	-0,250
Pes espigues/ Biomassa total	0,243	0,428	-0,192	-0,392	0,037	-0,210	-0,316	0,038	-0,370	-0,145	-0,144	-0,331	-0,250
Grans/ Espiga	-0,015	-0,306	0,294	0,218	0,176	0,279	0,290	0,035	-0,226	0,318	0,308	0,289	0,257

Taula 8a. Correlació de Perason dos a dos entre les dades producció vegetal final i propietats químiques. Es considera que hi havia correlació lleugera si el coeficient era entre 0,5-0,7 (marcats en taronja) o important si >0,7 (marcats en verd). El signe negatiu indica correlació negativa (continua a Taula 8b).

	pH	Alçada	Fillols	Espigues	Pes palla	Pes espigues	Biomassa total	Espigues/ fillol	Pes espigues/ Pes palla	Pes espigues/ Biomassa total	Grans/ Espiga
pH	1										
Alçada	-0,257	1									
Fillols	-0,036	0,503	1								
Espigues	-0,067	0,532	0,823	1							
Pes palla	-0,389	0,534	0,142	0,245	1						
Pes espigues	0,036	0,491	0,682	0,680	-0,051	1					
Biomassa total	-0,164	0,755	0,694	0,761	0,526	0,776	1				
Espigues/ fillol	0,015	0,416	0,120	0,611	0,336	0,243	0,463	1			
Pes espigues/ Pes palla	0,300	0,052	0,329	0,240	-0,605	0,712	0,183	-0,057	1		
Pes espigues/ Biomassa total	0,300	0,052	0,329	0,240	-0,605	0,712	0,183	-0,057	1,000	1	
Grans/ Espiga	-0,467	0,156	0,332	0,164	0,259	0,231	0,353	-0,157	-0,104	-0,104	1

Taula 8b.

Les anàlisis químiques realitzades per correlacionar amb la producció del cultiu s'han fet amb la fracció soluble, que tot i no correspondre exactament a la fracció biodisponible per a les plantes (que inclou aquesta i una part dels nutrients adsorbida al complex de canvi), hauria de donar indicis de canvis importants en el 'pool' de nutrients en el sòl en cada tractament de biochar i temps de mostreig, ja que la fracció soluble i l'adsorbida es troben en equilibri. Aquesta fracció soluble podria també correlacionar amb els efectes en la producció del cultiu, alhora que és totalment representativa de les potencials pèrdues de nutrients per lixiviació.

La fracció soluble és el resultat final de processos d'entrada i de pèrdua de nutrients que actuen simultàniament, en la major part dels quals el biochar pot contribuir directa o indirectament.

Com a processos d'**entrada** de nutrients a la fracció soluble tenim (1) l'aport provinent de la fertilització, també inicialment poc després de l'aplicació en el cas del biochar, que conté una petita quantitat de cendres, però també per la descomposició de la fracció làbil que conté; (2) la mineralització de la matèria orgànica nadiua, la qual pot ser influenciada per la presència de biochar, en l'anomenat 'priming effect' associada als canvis en les comunitats microbianes exercit pel biochar.

Com a processos de **pèrdua** de nutrients de la fracció soluble tenim (1) l'adsorció al sòl, incrementada en presència de biochar, que reté sobretot cations, que augmenta amb l'envelliment del biochar en el sòl, i que en menor grau, reté també anions; (2) l'assimilació per part del cultiu o de la biomassa microbiana; (3) pèrdues per lixiviació cap a l'aquífer o per escorrentia superficial; (4) pèrdua en forma gasosa, com en el cas del C i del N, els quals també s'ha vist que la presència de biochar pot alterar.

Finalment, també es produeixen **transformacions** dins d'aquesta fracció sense sortir del sistema, com és el cas de les formes de N en l'anomenat cicle del N, en el qual diferents formes de N (N_2 , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- i N_2O) s'intercanvien en processos principalment mediat per microorganismes.

Diferències entre tractaments de biochar i en el temps

Humitat, pH i CE

La humitat va variar en els diferents mostreigs d'acord amb la variació climàtica anual de la zona, però també varem observar un increment de la retenció d'aigua amb la dosi de biochar, fet que concorda amb altres estudis (Glaser et al, 2002), i que es relaciona amb l'estructura porosa del biochar, que permet retenir més aigua que un sòl típic (Downie et al, 2007; Dünisch et al, 2007). Aquest resultat confirma la nostra hipòtesi inicial de una major retenció d'humitat en presència de biochar.

En el cas del pH no es van observar efectes significatius generals ni en el temps ni amb la dosi de biochar. Aquest resultat va en contra d'altres estudis on s'observava un clar efecte alcalinitzant, tot i que en aquests estudis els sòls estudiats eren àcids (Mbagwu 1989; Matsubara

et al, 2002; Lehmann et al, 2003). En aquest estudi, el sòl era clarament bàsic des de l'inici, de manera que aquest efecte no va ser observat.

Pel què fa a la CE, els valors significativament més elevats en el tractament B2 en el primer mostreig s'explicarien per la naturalesa del biochar utilitzat, procedent d'una gasificació, que té una CE més elevada en comparació a altres tipus de biochar produïts per altres processos de piròlisi realitzats a menor temperatura (McDougall, 1991; Gundale i DeLuca, 2006), i sobretot degut al seu contingut en cendres ja que aquest tipus de piròlisi es fa amb una petita quantitat d'oxigen (Guascor SA, comunicació personal). Altres factors com el tipus de material de partida també que poden influir fortament en aquest factor en la CE (Lehmann, 2011). La mineralització de la fracció més làbil de biochar (Paco, 2012) també hauria contribuït secundàriament a aquest resultat. L'augment general de la CE en el segon mostreig és atribuïble a l'aplicació de fertilitzant unes setmanes abans, probablement també a l'aport del biochar tot i que no s'observen diferències ja que l'aport del purí sobrepassa qualsevol diferència entre tractaments de biochar. Aquest efecte d'increment en la CE desapareix progressivament fins el darrer mostreig, on no s'observaren diferències fent augmentar molt les concentracions en el segon mostreig. En tots els casos, la CE està per sota de poder exercir efectes nocius per al cultiu, que podrien aparèixer per sobre dels 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Alguns autors han indicat l'augment inicial de la CE amb l'aplicació del biochar correspon sobretot a K^+ i Na^+ (Lehmann et al. 2003, Novak et al. 2009), fet que concorda amb el nostre estudi, on hem detectar una correlació significativa entre dosi de biochar aplicada i K soluble.

Cations

En el cas del Ca^{2+} i el Na^+ , no s'han observat diferències significatives i els valors del tres tractaments al llarg del temps no han variat entre ells, exceptuant el segon mostreig degut exclusivament a l'aport del purí. Aquest fet contradiu altres estudis que han indicat diferències significatives en les concentracions de calci entre tractaments, ja que la cendra que conté el biochar és rica en Ca^{2+} (Lehmann i Joseph, 2009) i també de Na^+ (Glaser et al, 2002; Belanger et al, 2004; Keech et al, 2005; Liang et al, 2006).

Segons la bibliografia disponible, esperaríem un descens de les quantitats d' NH_4^+ al sòl degut a l'absorció d'aquest per part del biochar (Le Leuch i Bandosz, 2007) i a una intensificació dels processos de nitrificació que el transformarien en NO_3^- , tot i que el contrari també s'ha pogut observar en altres estudis (Kookana et al. 2011). En el nostre estudi hem observat aquesta disminució per la correlació negativa de l' NH_4^+ amb la dosi de biochar, que es reflexa també en el cas de l' NO_3^- . El fet que NH_4^+ soluble del sòl sigui el resultat de bona part dels processos d'entrada i pèrdua de nutrients de la fracció soluble, incloent pèrdues en forma gasosa, fa difícil interpretar aquest resultat, però els resultats suggereixen una retenció de l' NH_4^+ en el complex de canvi (del 50-80% segons Dempster et al. 2012) que reduiria també la seva nitrificació a NO_3^- . Aquest fet podria comportar que més nitrogen quedés disponible per les plantes alhora que es reduïrien les pèrdues en forma gasosa (NH_3^+) però sobretot per lixiviació en forma de NO_3^- , com mostren els nivells significativament més baixos de NO_3^- en el tercer i quart mostreig.

Pel què fa al K^+ , hi ha una relació directa amb la quantitat de biochar afegida, com ja s'ha esmentat, en tots els temps de mostreig, malgrat que una part del total és retinguda en el complex de canvi (Dünisch et al, 2007).

S'observen diferències significativament més elevades de Mg^{2+} en la dosi B2, fet que s'explica pel fort contingut d'aquest element en molts biochar indicat en estudis similars (Lehmann i Joseph, 2009). Malgrat tot aquest efecte és transitori i desapareix en el darrer mostreig.

Anions

El cas del Cl^- és molt semblant al dels SO_4^{2-} , ja que s'observen diferències significatives només en el primer mostreig a la dosi B2, desapareixent aquestes amb la fertilització amb purí i en el temps, indicant una baixa retenció o un important rentat o assimilació per part de plantes o microorganismes d'aquests elements aportats directament pel biochar. No hi ha estudis disponibles sobre el destí d'aquests anions en sòls esmenats amb biochar.

Tal com ja s'ha indicat en l'apartat anterior, el NO_3^- disminueix en la dosi de biochar més elevada en tots els mostreigs, fet observat en estudis similars i probablement associada a una menor disponibilitat de NH_4^+ per a la nitrificació, malgrat que altres processos com l'assimilació per part de les plantes o la biomassa microbiana o bé la inhibició directa de la nitrificació podrien també contribuir aquest efecte (Laird 2010).

Pel què fa al PO_4^{3-} , s'ha suggerit que l'aplicació de biochar hauria d'incrementar-ne les concentracions, i augmentar la producció vegetal en ser aquest un element limitant de la producció primària (Sohi et al. 2010). Malgrat en aquest estudi es va observar una reducció dels PO_4^{3-} en el tractament B2 en la major part de mostreigs excepte el darrer, és difícil d'explicar per processos d'adsorció en tractar-se d'un anió però s'ha proposat que podria ser deguda a l'assimilació per part de plantes o microorganismes. En un estudi similar, Laird et al. (2010) també observaren una reducció del P en lixiviats aquosos de columnes amb sòl esmenat amb biochar, reducció que proposen que és deguda a la retenció en el biochar en forma d'ortofosfat o de fòsfor orgànic.

Finalment, els nivells de NO_2^- no van patir canvis en el temps ni entre tractaments, degut a que és una forma de N molt transitòria en el sòl i per tant molt depenent de les microcondicions locals del punt mostrejat, com mostra l'amplitud de les desviacions típiques en els seus valors de concentració.

Producció vegetal

Com podem observar en la **Taula 7**, cap de les variables de producció analitzades té relació directa amb la presència de biochar al sòl. Per tant, podem dir que no hi ha evidències que el biochar hagi augmentat la producció d'ordi en relació al control, però tampoc que l'hagi perjudicat malgrat la reducció dels nivells dels dos elements més limitants per la producció primària (NH_4^+/NO_3^- i PO_4^{3-}). En concordança amb aquesta dada, no es van observar correlacions entre la producció vegetal i canvis en propietats químiques del sòl, fet que concorda amb el nul efecte de l'aplicació de biochar en la producció vegetal amb l'excepció del pes de palla que correlacionava lleugerament amb els nivells de NH_4^+ i Mg^{2+} durant el període de creixement del cultiu.

CONCLUSIONS

- L'aplicació de biochar no va tenir cap efecte ni positiu ni negatiu en la producció d'ordi, en contra de la hipòtesi inicial, malgrat que hi van haver canvis significatius en algunes propietats químiques del sòl (humitat del sòl, CE, K^+ , Mg^{2+} , NO_3^- , PO_4^{3-}), algunes d'elles els principals elements que limiten la producció primària (sobretot NO_3^- , PO_4^{3-}). Això pot indicar que la (1) fracció soluble en aigua no és representativa de la disponible per les plantes; (2) que aquests canvis no han estat suficientment grans com per reflexar-se en una major producció del cultiu; (3) que el sòl utilitzat era ja prou fèrtil com per a que els canvis exercits pel biochar no es veiessin reflexats en la producció del cultiu, o bé, (4) que caldria esperar més temps per veure'n els efectes positius o negatius a més llarg termini.
- S'ha constatat una reducció significativa de la quantitat de nitrats solubles en els sòls esmenats amb la dosi més elevada de biochar (30 t/ha), fet que suggereix una potencial reducció de l'impacte negatiu per als aqüífers dels nitrats, un dels principals problemes ambientals al nostre país, sense que això suposi una reducció en la producció del cultiu.
- Finalment, l'ús de biochar en un escenari agrícola hauria tingut altres beneficis ambientals com són el segrestament de carboni, la gestió de residus i la producció d'energia neta.

Per tant, podem concloure que l'aplicació de biochar ha comportat efectes positius en la reducció de la contaminació per nitrats dels aqüífers, la valorització dels residus i el segrest de carboni al sòl, tot i que queden per demostrar els seus efectes beneficiosos per a la producció vegetal. Els resultats d'aquest estudi, però, són altament dependents del sòl i biochar utilitzats, i no hauríem de descartar possibles efectes beneficiosos per al cultiu en sòls menys fèrtils o a més llarg termini en el sòl estudiat, ja que les propietats beneficioses del biochar teòricament augmenten amb el temps de residència al sòl.

AGRAÏMENTS

Vull agrair especialment a Xavier Domene per la seva funció com a tutor i la seva professionalitat alhora de dirigir aquest projecte. També agrair a la Estefania Mattana, a la Gianna Melas, l'Oriol Ortiz, el Josep Maria Alcañiz i l'Evan Marks per la seva ajuda, temps i consells prestats com a la resta de treballadors i col·laboradors del grup de sòls del CREAM per fer-me sentir còmode i posar-me totes les facilitats possibles.

Per últim agrair a la meua família, amics i a l'Anna pel temps, l'esforç, la dedicació i la comprensió en la realització d'aquest projecte.

REFERÈNCIES

- Allen, S. C., Jose, S., Nair, P. K. R. , Brecke, B.J., Nkedi-Kizza, P and Ramsey, C. L. (2004) Safety-net role of tree roots: Evidence from a pecan (*Cary illinoensis* K. Kroch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States', *Forest Ecology and Management*, vol 192, pp 395-407
- Amonette, J.E. and Joseph, S.(2009). Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. Chapter 3. In: Lehmann, J. i Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Ed Earthscan, London, UK
- Belanger, N.I., Cote, B., Fyles, J.W., Chourchesne, F. and Hendershot, W.H. (2004) 'Forest regrowth as the controlling factor of soil nutrient availability 75 years after fire in a deciduous forest of southern Quebec', *Plant Soil*, vol 262, pp 363-3 72
- Bridle, T. R. and Pritchard D. (2004) 'Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis', *Water Science and Technology*, vol 50, pp 169-175
- Cantrell, K., Ro, K. , Mahajan, D., Anjom, M. and Hunt, P. G. (2007) 'Role of thermochemical conversion in livestock waste-to-energy treatments: Obstacles and opportunities', *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol 46, pp 8918-8927
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N. and Smith, V. H. (1998) 'Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen', *Ecological Applications*, published by The Ecological Society of America, vol 8, pp 559-568
- Casselman, A. (2007) 'Inspired by Ancient Amazonians, a Plan to Convert Trash into Environmental Treasure'. *Scientific American*.
- Cheng, C. H., Lehmann J. and Engelhard, M. H. (2008) 'Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol 72, pp 1598- 1610
- Cheng, C. H., Lehmann J., Thies J. E., Burton, S. D. and Engelhard M. H. (2006) 'Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes', *Organic Geochemistry*, vol 37, pp 1477- 1488
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E. And Burton, S. D. (2008) 'Stability of black carbon in soils across a climatic gradient', *Journal of Geophysical Research*, vol 113, G02027
- DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., i Gundale, M.J.. (2009). Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations. Chapter 14. In: Lehmann, J. i Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Ed Earthscan, London, UK
- DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., i Gundale, M.J.. (2009). Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations. Chapter 14. In: Lehmann, J. i Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Ed Earthscan, London, UK
- Dempster DN, Gleeson DB, Solaiman ZM, Jones DL, Murphy DV. 2012a. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant Soil* 354: 311-324.

Downie, A., Crosky, A. i Munroe, P. (2009). Physical Properties of Biochar. Chapter 2. In: Lehmann, J. i Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Ed Earthscan, London, UK.

Downie, A., Van Zwieten, L., Chan, K. Y, Dougherty, W. and Joseph, S. (2007) 'Nutrient retention characteristics of agrichar and the agronomic implications', Poster presented at the International Agrichar Initiative Conference, April 2007, Terrigal, NSW, Australia

Dünisch, O., Lima, V. C., Seehann, G., Donath, J., Montoia, V. R. and Schwarz, T. (2007) 'Retention properties of wood residues and their potential for soil amelioration', Wood Science and Technology, vol 41 , pp 169-189

Erickson, C. (2003). 'Historical Ecology and Future Explorations». Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management. J. Lehmann et al. (eds.)'

Ezawa, T., Yamamoto, K. and Yoshida, S. (2002) 'Enhancement of the effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi by inorganic soil amendments', Soil Science and Plant Nutrition, vol 48, pp897-900

FAO (United Nations Food and Agriculture Organization) (2006) The State of Food Insecurity in the World, FAO, Rome, www.rao.org/docrcp/009/a0750e/a0750eOO.htm

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M.T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N. and Snyder, P. K. (2005) 'Global consequences of land use' Science, vol 309, pp 570-574

Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. (2002) 'Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal- a review', Biology and Fertility of Soils, vol 35, pp 219-230

Gundale, M.J., and DeLuca, T. H. (2006) 'Temperature and substrate influence the chemical properties of charcoal in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem', Forest Ecology and Management, vol 231 , pp 86-93

Ishii, T. and Kadoya, K. (1994) 'Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus and vesicular-arbuscular mycorrhizal development', Journal of the Japanese Society of Horticultural Science, vol 63, pp529-535

Keech, O., Carcaillet, C. and Nilsson, M. C. (2005) 'Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: The role of wood porosity', Plant and Soil, vol 272, pp 291-300

Kookana RS, Sarmah AK, van Zwieten L, Krull E, Singh B. (2011). Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. Advances in Agronomy 112: 103-143.

Laird D, Fleming P, Wang B, Horton R, Karlen D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from Midwestern agricultural soil. Geoderma 158: 436-442.

Le Leuch, L. M. and Bandosz, T.J. (2007) The role of water and surface acidity on the reactive adsorption of ammonia on modified activated carbons' Carbon, vol 45, pp 568-578

- Lehmann J, da Silva Jr JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. (2003) Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil* 249: 343-357.
- Lehmann, J. i Joseph S. (2009) *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed Earthscan, London, UK, Chapter 1-15, pp 1-285
- Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. (2006) 'Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol 11, pp 403-427
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday, and D. Crowley (2011) Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology & Biochemistry* 30: 1-25.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizao, F.J., Petersen, J. and Neves, E. G. (2006) 'Black carbon increases cation exchange capacity in soils', *Soil Science Society of America Journal*, vol 70, pp 1719- 1730
- Major, J., J. Lehmann, M. Rondon, and C. Goodale. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Glob. Change Biol.* 16: 1366–1379.
- Major, J., Steiner, C., Downie, A., i Lehmann, J. (2009). Biochar Effects on Nutrient Leaching. Chapter 15. In: Lehmann, J. i Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed Earthscan, London, UK
- Mann, Ch. (2000). 'The Good Earth: Did People Improve The Amazon Basin?'
- Matsubara, Y.-I., Hasegawa, N. and Fukui, H. (2002) 'Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments', *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science* vol 71, pp 370-374
- Matteson, G. C. and Jenkins, B. M. (2007) 'Food and processing residues in California: Resource assessment and potential for power generation', *Bioresource Technology*, vol 98, pp 3098-3105
- Mbagwu, J. S. C. (1989) 'Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical Ultisol', *Biological Wastes*, vol 28, pp 1- 13
- Mc Dougall, J.S. (1991) *Afr. Inst. Min. Metall.* 91, 4: 109-120.
- Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das KC, Ahmedna M, Rehrich D, Watts DW, Busschner WJ, Schomberg H. 2009. Designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3: 185-206.
- Pietikainen, J., Kiiikkila, O. and Fritze, H. (2000) 'Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus', *Oikos*, vol 89, pp 231 – 242
- Robertson, G. P. and Swinton, S. M. (2005) 'Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: A grand challenge for agriculture', *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol 3, pp 38-46

- Rondon, M., Lehmann, J., Ramirez, J. And Hurtado, M. (2007) 'Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions', *Biology and Fertility of Soils*, vol 43, pp 699-708
- Rowe, E. C., Hairiah, K., Giller, K. E., Van Noordwijk, M. and Cadisch, G. (1998) 'Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by N-15 placement at different soil depths', *Agroforestry Systems*, vol 43, pp 81 - 93
- Saito, M. (1990) 'Charcoal as a micro habitat for VA mycorrhizal fungi, and its practical application', *Agriculture, Ecosystems, and the Environment*, vol 29, pp 341-344
- Sanchez, P. A. (2002) 'Soil fertility and hunger in Africa', *Science*, vol 295, pp 2019-2020
- Smith, Nigel J.H. (1980). 'Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia'
- Sohi, S. Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2009). "Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs". CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64pp.
- Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E., i Bol, R. (2010). A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In DONALD L. SPARKS, editor: *ADVANCES IN AGRONOMY*, Vol. 105, Burlington: Academic Press, pp 47-82
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehis, T., Macedo, J.L.V., Blum, W.E.H. and Zech, W. (2007) 'Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil', *Plant and Soil*, vol 291, pp 275-290
- Stevenson, F. J, and Cole, M. A. (1999) *Cycles of the Soil*, second edition, John Wiley and Sons, Inc, New York, NY
- Thies, J.E. i Rillig, M.C. (2009). Characteristics of Biochar: Biological Properties. Chapter 6. In: Lehmann, J. i Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed Earthscan, London, UK
- Vitousek, P. M. and Howarth, R.W. (1991) 'Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?' *Biogeochemistry*, vol 13, pp 87-115
- Wardle, D. A., Zackrisson, O. and Nilsson, M.-C. (1998) 'The charcoal effect in boreal forests: Mechanisms and ecological consequences', *Oecologia*, vol 115, pp 419-426
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T.W. and Rillig, M. C. (2007) 'Mycorrhizal response to biochar in soil - concepts and mechanisms', *Plant and Soil*, vol 300, pp 9-20
- Winklerprins, A.M. G. A (2002). 'A history of perceiving the soil in the Amazon Basin'.
- Woods W.I., Denevan, W.M. 'Discovery and Awareness of Anthropogenic Amazonian Dark Earths (Terra Preta)'
- Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F. , Anshiori, S. and Ogawa, M. (2006) 'Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia') *Soil Science and Plant Nutrition*, vol 52, pp 489-495

Zackrisson, O., Nilsson, IV1.-C. and Wardle, D. A. (1996) 'Key ecological function of charcoal from wildfire in the Boreal forest', *Oikos*, vol 77,pp 10-19